

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 528.716, 528.83, 528.851, 528.852, 528.854

ЛОМАКО

Алексей Андреевич

Методы регистрации и обработки данных оптического дистанционного зондирования Земли при проведении многоуровневых экспериментов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Минск, 2024

Научная работа выполнена в **Белорусском государственном университете и НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета.**

Научный руководитель – **Катковский Леонид Владимирович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией дистанционной
фотометрии НИУ «Институт прикладных
физических проблем имени А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета.

Официальные оппоненты: **Лысенко Сергей Александрович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
директор ГНУ «Институт природопользования
НАН Беларуси»;

Белоцерковский Алексей Маратович,
кандидат технических наук,
заведующий отделом интеллектуальных
информационных систем ГНУ «Объединенный
институт проблем информатики НАН Беларуси».

Оппонирующая организация – ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова
НАН Беларуси».

Защита состоится **6 декабря 2024 года в 14:00** на заседании совета по защите
диссертаций Д 02.01.10 при Белорусском государственном университете по
адресу: *Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета),
ауд. 407.*

Телефон ученого секретаря: +375(17) 209-57-09; e-mail: ramanau@bsu.by.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке
Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « 01 » ноября 2024 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
кандидат технических наук



А.Ф. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня одним из наиболее актуальных направлений при изучении природных явлений являются исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). К таким исследованиям помимо прочих относятся измерения, проводимые с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с малых высот, а также исследования, проводимые с помощью систем космического базирования: спутниковых систем и орбитальных станций. БПЛА и системы космического базирования в совокупности с наземной аппаратурой позволяют проводить трехуровневые эксперименты по исследованию спектральных отражательных характеристик объектов на поверхности Земли, которые могут использоваться в лесном хозяйстве, например, для детектирования усыханий хвои на ранних стадиях.

Данная проблема является крайне актуальной для территории Республики Беларусь. В этой области исследований на сегодняшний день отсутствует единый подход, учеными не выработаны методики для выявления стрессового состояния хвойных деревьев по их спектральным отражательным характеристикам с высокой точностью. Это обусловлено сложностью самой задачи и необходимостью получения большой обучающей выборки для различного рода моделей. Формирование такой выборки, в свою очередь, требует наличия высокоточной аппаратуры ДЗЗ. Кроме того, требуется разработка алгоритмов управления и обработки данных для новых образцов научной аппаратуры (НА), таких как беспилотный комплекс авиационного спектрометрирования (БЕКАС), предоставляющий данные авиационного уровня эксперимента, и система ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА), позволяющая автоматизировать процесс измерений на космическом уровне.

При этом важно отметить, что задача детектирования усыханий хвои в данном случае является лишь одним из вариантов применения описываемых в диссертационном исследовании методов и методик. Основной целью изысканий было создание фундаментального базиса для определения параметров и характеристик различных природных и антропогенных объектов Земли посредством оптического дистанционного зондирования.

Исходя из вышесказанного, в рамках диссертационной работы осуществлено развитие алгоритмов, методов и методик автоматизации процессов регистрации и обработки данных, получаемых при ДЗЗ в области анализа видеоспектральных и мультиспектральных изображений с использованием различной научной аппаратуры видимого и ближнего инфракрасного (ИК) излучения, что позволило повысить информативность и достоверность данных.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Исследования по диссертационной работе соответствуют п. 5 «Информатика и космические исследования» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2020 годы, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.04.2015 № 190, а также п/п. «Аэрокосмические и геоинформационные технологии» п. 1 «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства» Указа Президента Республики Беларусь «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 годы» от 07.05.2020 г. № 156.

Работа по теме диссертации выполнялась в отделе аэрокосмических исследований НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ в рамках следующих научных программ и проектов:

1. НИР «Разработка методов и программного комплекса тематической обработки гиперспектральных данных, получаемых бортовым комплексом дистанционного зондирования Земли для микроспутников». Договор с ОАО «Пеленг», 2014–2017 гг., № г.р. 20143776;

2. ГПНИ «Информатика, космические исследования и научное обеспечение безопасности человека, общества и государства», подпрограмма 9.1 «Информатика и космические исследования», задание 1.1.14 «Разработка видеоспектральных методов исследования из космоса атмосферы и поверхности Земли, моделирование и конструирование приборов для космических исследований», 2016–2020 гг., № г.р. 20163151;

3. НИОКР государственной программы «Наукоемкие технологии и техника», подпрограмма 7 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» «Разработка методов и систем повышения точности результатов аэрокосмического мониторинга природных ресурсов республики Беларусь», 2016–2020 гг., № г.р. 20180113;

4. СЧ ОКР «Разработка и изготовление системы ориентации видеоспектральной аппаратуры». Договор с ПАО «РКК «Энергия», 2017–2021 гг.;

5. СЧ ОКР «Проведение съемки и экспресс обработка полученных измерений НА ВСС (ФСС) для выдачи ИД на планирование экспериментов». Договор с ПАО «РКК «Энергия», 2017–2019 гг.;

6. СЧ ОКР «Проведение полетных калибровок НА «ВСС» (ФСС) с использованием многоуровневых измерений наземных тестовых объектов», Договор с ПАО «РКК «Энергия», 2017–2019 гг., № г.р. 20181193;

7. СЧ ОКР «Изготовление системы ориентации видеоспектральной аппаратуры» (СЧ ОКР «СОВА»), Договор с ПАО «РКК «Энергия», 2019–2022 гг.;

8. СЧ ОКР «Верификация данных многоуровневой спектрометрической съемки в процессе оперативного управления КЭ «Ураган» и «Сценарий»» (СЧ ОКР «Верификация – 1»), Договор с ПАО «РКК «Энергия», 2017–2019 гг.;

9. НТП Союзного государства «Интеграция-СГ» НИР «Разработка экспериментального образца аппаратно-программного комплекса, реализующего технологию измерений и валидации данных космической съемки на подспутниковых полигонах Беларуси и России», 2020–2023 гг.;

10. ГПНИ «Наукоемкие технологии и техника», подпрограмма 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях», задание «Создать гиперспектральную систему (ГСС) для стационарного высотного пункта сканирования тестовых площадок поверхности Земли для полетной калибровки спутниковых сенсоров», Договор с Министерством образования РБ, 2021-2025 гг.;

11. ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность общества и государства», 2021-2025 годы, подпрограмма 5.1 «Цифровые технологии и космическая информатика», раздел 9 «Технологии защиты информации и компьютерного анализа больших данных», задание 5.1.7.2 «Методики прогнозирования и контроля результатов космических съемок подстилающих поверхностей широкоугольной фото- и видеоспектральной аппаратурой в режиме ручного телеуправления с борта РС МКС», 2021–2025 гг.;

12. Отдельный проект НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ «Разработка и создание маломассогабаритной мультиспектральной аппаратуры беспилотного комплекса авиационной съемки для использования в научно-учебном процессе подготовки студентов БГУ по дистанционному мониторингу различных сред и объектов Республики Беларусь», 2022 г.;

13. СЧ ОКР «Верификация данных измерений в процессе оперативного управления МКС с использованием ПН «СОВА» (СЧ ОКР «Верификация-2»), Договор с ПАО «РКК «Энергия», 2022–2024 гг.;

14. СЧ ОКР «Проведение комплексных испытаний и предполетная подготовка СОВА-2-228 и СОВА-2-426» (СЧ ОКР «СОВА»), Договор с ПАО «РКК «Энергия», 2022–2023 гг.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью работы являлись разработка новых и развитие существующих методов и алгоритмов функционирования и обработки данных фотоспектральных, видеоспектральных и мультиспектральных систем оптического дистанционного зондирования для определения параметров и характеристик природных и антропогенных объектов Земли, позволяющих повысить эффективность работы с данными в части качества и информативности.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. разработать новые способы, методы и методики регистрации и обработки фото-, видео- и мультиспектральных данных ДЗЗ, получаемых с использованием БПЛА и космических носителей;
2. разработать методику для получения географически привязанных мультиспектральных данных для мониторинга состояния отдельных деревьев с возможностью хранения информации в специализированной базе данных;
3. разработать метод прогнозирования углов ориентации научной аппаратуры при съемке с борта МКС с использованием системы ориентации видеоспектральной аппаратуры СОВА для автоматизации процесса регистрации данных с борта МКС;
4. разработать методику получения данных дистанционного зондирования Земли с борта МКС, позволяющую в автоматизированном режиме получать географически привязанные изображения;
5. адаптировать разработанные методы обработки информации для использования в БЕКАС, СОВА и провести соответствующие испытания методов применительно к указанным системам.

Объектом исследования являются оптические и физические характеристики природных и антропогенных объектов поверхности Земли.

Предметом исследования являются спектральные, энергетические и пространственные характеристики оптического поля объектов поверхности Земли, регистрируемые дистанционно в виде спектров и изображений в области видимого и ближнего ИК излучения.

Научная новизна

1. Разработан метод автоматизированного получения панорамных изображений с учетом дисторсии фотоаппаратуры, основанный на существующих алгоритмах определения особых точек в изображениях и отличающийся использованием статистического анализа при оценке значений

метрик фильтрации особых точек при сопоставлении изображений, позволяющий в применении к БЕКАС обеспечить привязку поля зрения спектрометра к RGB-изображениям с относительной точностью $84,9 \pm 11,6\%$.

2. Разработан метод программной синхронизации данных спектрометра и обзорной камеры, позволяющий уменьшить среднеквадратичную величину ошибки синхронизации с 142 мс до 15 мс.

3. Разработан адаптивный метод географической привязки изображений сверхвысокого пространственного разрешения, зарегистрированных с борта БПЛА без использования систем кинематики реального времени, который позволяет уменьшить средний радиус разброса значений географических координат точек изображения относительно их математического ожидания на 45,6 % по сравнению с прямым наложением и на 14,6 % по сравнению с алгоритмом, использованным в ПО производителя БПЛА.

4. Разработан метод семантической сегментации мультиспектральных изображений, зарегистрированных с борта БПЛА, основанный на существующей модели нейросети и способе дополнительного поиска сегментов по значениям вегетационных индексов, который позволяет осуществлять выделение крон деревьев на изображениях подстилающей поверхности с точностью до 91,9 %.

5. Разработана методика получения данных дистанционного зондирования Земли с борта МКС путем прогнозирования углов ориентации научной аппаратуры для наведения с использованием системы ориентации видеоспектральной аппаратуры СОВА, которая позволяет уменьшить ошибку наведения на целевой объект с 52,2 км до 4,9 км и автоматизировать процесс регистрации и обработки изображений.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод автоматизированного формирования панорамных изображений при проведении авиационной и космической съемки высокого разрешения, отличающийся проведением предварительной коррекции искажений на изображениях, вызванных эффектом дисторсии, и использованием метрик фильтрации на основе статистического анализа пар ключевых точек на перекрывающихся изображениях, что позволило получить панорамные изображения со средним значением ошибки сшивки до 1,30 пикселя, а в применении к данным беспилотного комплекса авиаспектральной съемки БЕКАС получить фотоспектральные изображения с относительной точностью привязки спектров к RGB-кадрам до $84,9 \pm 11,6\%$.

2. Методика высокоточной обработки мультиспектральных, сверхвысокого пространственного разрешения изображений лесных территорий,

включающая семантическую сегментацию изображений на основе гистограммного анализа применительно к значениям вегетационных индексов в сегментах кадров, обеспечивающую увеличение статистической точности распознавания крон деревьев до 91,9%, а также адаптивную географическую привязку аэрофотоснимков с использованием апостериорной информации об объектах в кадрах, что обеспечило уменьшение среднего радиуса разброса значений географических координат деревьев на 14,6% по сравнению с известными методами.

3. Методика автоматического наведения съемочной аппаратуры, установленной на платформах наведения СОВА, и получения географически привязанных панорамных изображений с борта МКС, основанная на разработанной математической модели определения ориентации станции и управления съемочной аппаратурой, отличающаяся учетом взаимного положения объекта целевой съемки и станции, а также пространственной ориентации МКС в процессе наведения, что позволило уменьшить ошибку наведения на целевой объект более чем на порядок (с 52,2 км до 4,9 км).

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты диссертационной работы, а также положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Разработка методов исследования, алгоритмов численных расчетов и интерпретация результатов также осуществлены автором диссертации. Цель работы и задачи исследования были сформулированы совместно с научным руководителем Л.В. Катковским и руководителем научных программ Б. И. Беляевым. Оптические калибровки модулей БЕКАС, мультиспектральной камеры DJI Phantom 4 Multispectral, а также калибровки по углам ориентации СОВА осуществлялись Бручковским И. И. и Литвиновичем Г. С. Обработка калибровочных и экспериментальных данных БЕКАС и мультиспектральной камеры DJI осуществлялись автором лично. Метод формирования панорамных изображений по мультиспектральным данным БПЛА и методика обработки данных авиационных измерений для мониторинга состояния отдельных деревьев были разработаны автором лично. Разработка программного обеспечения для управления СОВА осуществлялась совместно со Станчиком В.В. Э.Э. Сармин и И.В. Рассказов помогали планировать космические эксперименты с использованием СОВА, а также осуществляли взаимодействие с экипажем Международной космической станции. Для получения данных использовалась научная аппаратура (БЕКАС, ФСР, СОВА), изготовленная в сотрудничестве с В. А. Сосенко, А. Д. Хомицевичем, А. В. Домарацким, Ю. В. Голубевым, П. В. Ивутем, А. В. Гуторовым и Н. С. Щербаковым. Географическая привязка спутниковых

данных осуществлялась совместно с Ю. С. Давидовичем. Методы и результаты исследований обсуждались совместно с соавторами Б. И. Беляевым, Л. В. Катковским, О. О. Красовской (Силук), В. А. Сосенко, М. Ю. Беляевым, А. О. Мартиновым, В. В. Рязанцевым, С. И. Гуляевой.

В диссертационную работу не включены результаты, которые были получены другими соавторами или с другими соавторами. Материалы совместных публикаций использованы соискателем в объеме авторского вклада.

Автор работы выражает благодарность всему коллективу отдела аэрокосмических исследований за квалифицированные советы и методологическую помощь при выполнении настоящей работы.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на конференциях: 72-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ (Минск, 11–22 мая 2015 г.); 14-й, 15-й, 16-й, 18-й, 19-й, 20-й и 21-й Всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 14–18 ноября 2016 г., 13–17 ноября 2017 г., 12–16 ноября 2018 г., 16–20 ноября 2020 г., 15–19 ноября 2021 г., 14–18 ноября 2022 г.; 13–17 ноября 2023 г.); 4-й, 5-й, 6-й и 7-й Международных научно-практических конференциях «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (11–12 мая 2017 г., 16–17 мая 2019 г., 20–21 мая 2021 г., 18–19 мая 2023 г.); 59-й и 60-й ежегодных конференциях для студентов физических и естественных наук «Open Readings» (Вильнюс, 15–18 марта 2016 г., 14–17 марта 2017 г.); 9-й, 12-й, 13-й, 15-й и 16-й Международных научно-практических конференциях «Приборостроение» (Минск, 23–25 ноября 2016 г.; 13–15 ноября 2019 г.; 18–20 ноября 2020 г.; 16–18 ноября 2022 г.; 15–17 ноября 2023 г.); Международной конференции «European Geosciences Union» 2019 (Вена, 7–12 апреля 2019 г.); Восьмом Белорусском космическом конгрессе (Минск, 25–27 октября 2022 г.); 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г.); Международной научно-практической конференции «I Белорусский географический конгресс» (Минск, 9–13 апреля 2024 г.).

Результаты работы соискателя внедрены в НИИ КС им. А.А. Максимова – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» при выполнении научно-исследовательских работ в рамках научно-технической программы Союзного государства «Разработка, модернизация и гармонизация нормативного,

организационно-методического и аппаратно-программного обеспечения целевого применения космических систем ДЗЗ России и Беларуси» («Интеграция-СГ») (акт о практическом использовании результатов исследования от 09.09.2023), в Центр целевого использования МКС ПАО «РКК «Энергия» для автоматизации процесса регистрации данных с борта РС МКС с помощью НА СОВА (акт о практическом использовании результатов исследования от 24.04.2024).

По результатам диссертации получены 2 патента Республики Беларусь на полезную модель.

Опубликование результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 47 научных работах, из них 7 статей в рецензируемых научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 7,8 авторского листа), 2 статьи в других научных изданиях, 19 статей в сборниках материалов научных конференций, 19 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников, трех приложений. Полный объем диссертации составляет 146 страниц, в том числе 36 рисунков занимают 17 страниц, 8 таблиц на 3 страницах, 3 приложения на 17 страницах. Список использованных источников состоит из 196 наименований, включая 47 собственных публикаций соискателя (занимает 23 страницы).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе представлен анализ современных научно-технических тенденций в области ДЗЗ при проведении исследований с наличием различных уровней измерений: наземным (включая лабораторные и полевые измерения), авиационным и космическим. Описываются проведенные эксперименты по исследованию природных объектов и параметров работы аппаратуры на различных уровнях измерений.

Приведена классификация данных ДЗЗ в зависимости от вида их представления. Выделены особенности регистрации и предварительной обработки данных в зависимости от уровня измерений. Отмечается важность процедур первичной и летной калибровки НА для пересчета единиц «сырых значений» яркости в физические величины спектральной плотности

энергетической яркости (СПЭЯ) или коэффициенты спектральной яркости (КСЯ). Приводится описание функционального назначения отдельных уровней измерений при проведении многоуровневых экспериментов по исследованию отражательных характеристик объектов земной поверхности. Наземный уровень измерений важен для описания тестовых объектов, получения отражательных характеристик в отдельных точках для последующей валидации данных авиационных и спутниковых измерений. Авиационный и космический уровни являются основными источниками данных ДЗЗ. Отмечается, что в области регистрации данных системами космического базирования существуют различия в алгоритмах ориентирования полей зрения аппаратуры. Использование гиродинных систем недоступно для МКС, что приводит к сложностям при регистрации спектральных отражательных характеристик объектов поверхности Земли.

Описываются существующие программные решения, предназначенные для предварительной и тематической обработки данных ДЗЗ. Отмечается, что на сегодняшний день не существует универсального программного продукта, и большинство из них не справляется с задачей сшивки изображений лесного массива сверхвысокого пространственного разрешения, зарегистрированных с предельно малых высот.

В главе также приводится описание методов интеллектуального анализа данных ДЗЗ, области их применения. В частности, описывается существующий подход к обработке данных ДЗЗ в сфере лесоустройства. Представлен набор информативных вегетационных индексов для определения состояния хвойных насаждений по данным мультиспектральных изображений, зарегистрированных с использованием БПЛА. Указывается на важность продолжения исследований по детектированию усыханий хвойных насаждений на ранних стадиях. Отмечается необходимость проведения мультिवременных исследований с осуществлением анализа по кронам отдельных деревьев и одновременно с этим отсутствие единого подхода в науке к таким исследованиям.

Во второй главе приводится описание ряда разработанных и существующих приборов, которые использовались в диссертационном исследовании. Кроме того, представлены методики и результаты оценки фотограмметрических параметров отдельных видов НА.

На наземном уровне измерений использовался фотоспектрорадиометр ФСР-02, позволяющий регистрировать спектры отраженного от подстилающих поверхностей солнечного излучения в диапазоне 400–900 нм со спектральным разрешением 4,3 нм.

На авиационном уровне измерений использовались БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral (P4M), оборудованный камерой, позволяющей регистрировать

RGB-изображения и изображения в 5 спектральных каналах: синем (450 ± 16 нм), зеленом (560 ± 16 нм), красном (650 ± 16 нм), красном крае (730 ± 16 нм) и ближнем ИК (840 ± 26 нм), а также разработанный БЕКАС, позволяющий одновременно регистрировать спектры в диапазоне 350–935 нм со спектральным разрешением 4 нм и видеоряды данных с разрешением 1920×1080 пикселей и частотой 30 кадров/с.

На космическом уровне исследований использовалась разработанная СОВА, предназначенная для автоматизации процесса измерения оптических характеристик подстилающих поверхностей при выполнении мониторинга Земли из космоса. Существует три модификации СОВА: СОВА-1-426, которая устанавливается на иллюминатор служебного модуля российского сегмента (РС) МКС и работает на борту с декабря 2019 года; СОВА-2-426 и СОВА-2-228, которые устанавливаются на иллюминаторы многофункционального лабораторного модуля РС МКС и работают на борту с августа 2023 года. СОВА-2-426, как и СОВА-1-426, может осуществлять наведение поля зрения одновременно по двум взаимно перпендикулярным осям в диапазоне ± 30 градусов от ортогонали к поверхности иллюминатора. СОВА-2-228 осуществляет наведение только по одной оси в диапазоне ± 20 градусов от ортогонали к поверхности иллюминатора. На эти системы может устанавливаться НА «Видеоспектральная система» или фотоаппаратура. В экспериментах, результаты которых использовались в диссертационном исследовании, применялся фотоаппарат Nikon D5 с объективом AF-S Nikkor 200-400 мм.

В главе также представлены методики экспериментальной оценки фотограмметрических параметров НА, использованной в исследовании. В частности, описана существующая методика определения коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии, основанная на анализе методами библиотеки компьютерного зрения OpenCV изображений специфической калибровочной миры, представляющей собой шахматную доску с расположенными в белых квадратах графическими кодами (ChArUco). Методика была применена к данным Р4М, БЕКАС и фотоаппарата Nikon D5, что позволило оценить параметры дисторсии камер. Кроме того, в главе представлена модификация существующих методик определения углового разрешения и разрешающей способности аэрофотосистем, а также результаты ее применения к данным Р4М и БЕКАС. Полученные результаты позволили выявить существенное расхождение экспериментально полученных величин с теоретическими значениями углового пространственного разрешения, рассчитанными на основе заводских характеристик камер. Экспериментальная

оценка фотограмметрических характеристик НА предоставила информацию, сыгравшую важную роль на следующих этапах диссертационного исследования.

В третьей главе описывается разработанный метод автоматизированного формирования панорамных изображений, который был реализован в виде программного модуля обработки данных, полученных на авиационном и космическом уровнях проведения экспериментов.

Новый метод формирования панорамных изображений основан на известных методах поиска в кадрах особых точек – областей, изображение каждой из которых можно отличить от изображения всех соседних с ней. При этом особые точки описываются специальной математической конструкцией – дескрипторами. В работе проводилось сравнение известных в науке детекторов и дескрипторов особых точек с выявлением наилучшей комбинации алгоритмов для задачи совмещения изображений лесного массива. Была выявлена наилучшая комбинация детектора и дескриптора особых областей – методы ORB (*англ.*, Oriented FAST and Rotated BRIEF) и FRAEK (*англ.*, Fast Retinal Key-point) в сочетании с методом сопоставления прямым перебором с метрикой Хэмминга.

Первой отличительной особенностью метода является новый способ фильтрации совпадений особых точек на совмещаемых изображениях, основанный на использовании двух новых метрик для сопоставления пар особых точек. Одна из метрик – длина отрезка, соединяющего центры совпадающих областей; вторая – угол наклона отрезка, соединяющего центры особых областей. По всему набору совпадений особых точек двух изображений определяются моды метрик R_M, α_M , соответственно. В таком случае критерием для отбора i -го соответствия может считаться попадание значений обеих метрик этого соответствия в доверительные интервалы, выбираемые экспериментально:

$$\begin{cases} |R_M - R_i| < \varepsilon_R \\ |\alpha_M - \alpha_i| < \varepsilon_\alpha \end{cases},$$

где ε_R – максимально допустимое отклонение длины отрезка, соединяющего совпадения, от моды распределения по всему списку совпадений;

ε_α – максимально допустимое отклонение угла наклона отрезка, соединяющего совпадения, от моды распределения по всему списку совпадений;

R_i, α_i – значения метрик i -го соответствия.

Второй отличительной особенностью метода является необходимость коррекции эффекта дисторсии фотоаппаратуры на изображениях перед их комбинированием. В главе показано, что при условии учета параметров дисторсии камеры среднеквадратичное отклонение смещения между точками

соседних изображений при формировании панорамного изображения уменьшается в среднем на величину от 12,5% до 16% в зависимости от НА.

Описывается способ оценки неопределенностей при сшивке изображений. Первоначальная оценка работы метода проводилась для изображений камеры Р4М. Ошибки сшивки в среднем составили до 5 пк. Разработанный метод впоследствии был применен для обработки данных БЕКАС. Это в совокупности с новым алгоритмом программной синхронизации спектрометра и обзорной камеры позволило разработать способ получения данных БЕКАС в фотоспектральном представлении (рисунок 1), обеспечивающий привязку поля зрения спектрометра к RGB-изображениям с относительной точностью $84,9 \pm 11,6 \%$.

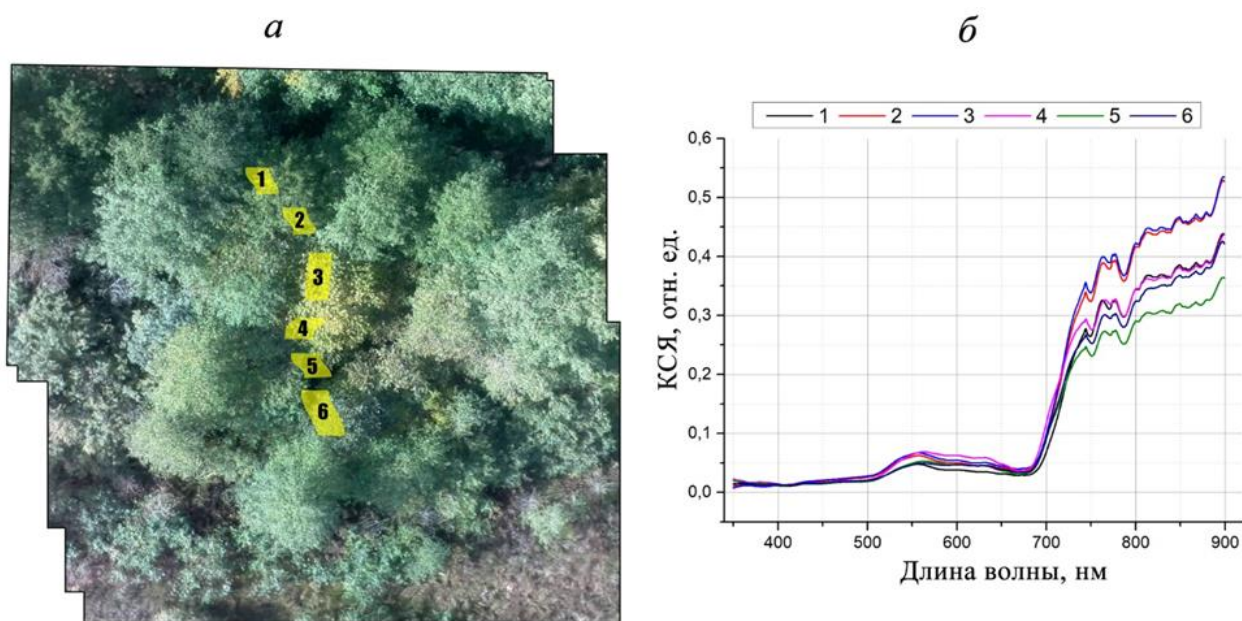


Рисунок 1 – Комбинирование фотоспектральных данных БЕКАС: сшитое изображение (а); спектры КСЯ, соответствующие выделенным областям изображения (б)

Кроме того, разработанный метод был проверен на изображениях, зарегистрированных фотоаппаратом Nikon D5, установленным на СОВА в процессе выполнения космического эксперимента (КЭ) «Ураган» на борту МКС. Это позволило сгенерировать сшитые изображения по результатам серии измерений со средним значением ошибки 2,01 пк и среднеквадратичным отклонением (СКО) ошибки 0,60 пк.

Четвертая глава описывает методику обработки мультиспектральных изображений леса сверхвысокого пространственного разрешения, зарегистрированных с борта БПЛА с предельно малых высот (до 100 м), предназначенную для мониторинга состояния отдельных деревьев.

Методику можно разделить на три основных этапа:

- 1) применение нового адаптивного метода географической привязки данных на основе апостериорной информации об объектах в кадре без использования систем кинематики реального времени;
- 2) семантическая сегментация изображений с применением нового автоматического алгоритма уточнения результатов сегментации нейросетью *Deep Forest*, основанного на вычислении значений вегетационных индексов по мультиспектральному изображению с последующим анализом;
- 3) преобразование обработанных данных в наборы специализированных информационных признаков для возможности их хранения в специально созданной базе данных спектральных отражательных характеристик.

Предложенный адаптивный метод географической привязки изображений основан на изменении масштаба изображений в зависимости от соотношения расстояний, рассчитываемых на основе базовой геопривязки центров аэрофотоснимков и расстояний, рассчитываемых на основе координат особых точек в аэрофотоснимках. Это позволяет нивелировать фактор различия линейного разрешения на пиксель в разных областях изображений, что уменьшает средний радиус разброса значений географических координат деревьев относительно их математического ожидания на 46% по сравнению с прямым наложением координат и на 15% по сравнению с алгоритмом, использованным в программном обеспечении производителя БПЛА.

При семантической сегментации изображений с целью выделения прямоугольных областей, соответствующих кронам деревьев, используется предварительно обученный нейросетевой алгоритм *Deep Forest*. Для уточнения результатов сегментации применяется новый многоэтапный алгоритм, использующий помимо RGB-изображений данные, полученные при вычислении значений вегетационных индексов. По итогам применения алгоритма значение статистической точности сегментации (*F-score*) составило 91,9%, что больше аналогичной точности для нейросети *Deep Forest* на 16,6%. При этом последним этапом алгоритма является формирование маски крон деревьев с исключением областей изображения, соответствующих территории подлеска (рисунок 2).

Все спектральные отражательные характеристики по контурам каждого дерева нормируются на измеренные в наземных условиях спектры молочного стекла МС-10, зарегистрированные фотоспектрорадиометром ФСП-02, с учетом энергетических калибровок спектрометра и камеры, а также спектрального отклика каналов камеры. На основе таких спектральных значений для каждого дерева формируется вектор значений вегетационных индексов, подходящих для мониторинга состояния древостоев. После дополнения метаданными (географические координаты, уровень облачности, уровень возвышения

Солнца и др.) информация включается в специализированную спектральную реляционную базу данных (построенную на основе модели SQLite). Важно отметить, что в базу включается информация об отражательных характеристиках как внутри контуров, так и внутри прямоугольных сегментов, что позволяет в будущем адаптировать результаты обработки данных к спутниковым снимкам.

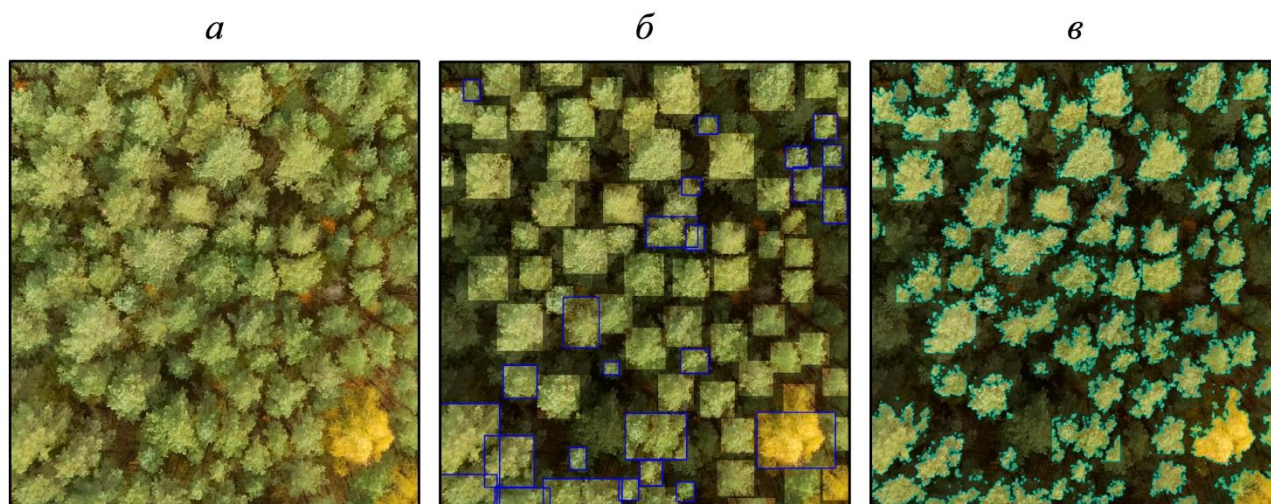


Рисунок 2 – Этапы семантической сегментации изображения: фрагмент исходного кадра (а); изображение с маской крон деревьев, вычисленной с использованием модели Deep Forest и наложенными масками после дополнительного поиска сегментов (б); изображение после оконтуривания крон деревьев (в)

В пятой главе представлена методика получения геопривязанных данных при съемке с борта МКС с использованием СОВА, необходимая для совершенствования процесса исследований с использованием данных космического уровня. В главе анализируется динамика движения МКС, оценивается степень влияния углов ориентации Станции на ошибку наведения на объекты поверхности Земли, в результате чего выявлено, что в случае игнорирования значений углов крена, тангажа и курса МКС в процессе ориентации полей зрения НА с использованием СОВА ошибки наведения на объекты земной поверхности могут достигать величин до 60 км.

Описывается разработанный метод наведения полей зрения НА с использованием СОВА, учитывающий ориентацию МКС в режиме, близком к режиму реального времени, реализованный в виде модуля в программном обеспечении управления СОВА. Метод основан на расчетах траектории МКС на базе модели орбитального движения искусственных спутников Земли SGP4 с уточнением прогноза путем преобразования векторов наведения СОВА с учетом кватернионов разворота связанной системы координат станции.

Описываются подходы к обработке изображений, получаемых с борта МКС, в том числе, способы географической привязки данных. Приводится

обобщенная методика получения данных, включающая этапы выдачи целеуказаний, регистрации данных ДЗЗ, их сшивки в мозаики (с автоматической оценкой неопределенностей) и последующей геопривязки.

С использованием экспериментальных данных и моделирования определяется степень влияния учета ориентации станции на точность наведения бортовой научной аппаратуры. Математическое ожидание ошибки наведения СОВА без учета данных об ориентации МКС для изображений, зарегистрированных в ходе КЭ, составило 52,2 км с СКО 13,4 км. Отмечается, что максимально достижимая точность за счет учета ориентации МКС может повыситься до 4,9 км, а при учете времени рассинхронизации – до 1,4 км. По расчетам при учете ориентации МКС точность наведения СОВА в среднем позволяет обеспечить попадание необходимого объекта в поле зрения НА. Неопределенность при геопривязке и сшивке для набора изображений, зарегистрированных в ходе КЭ, с учетом коэффициента охвата составила $22,9 \pm 13,1$ м. Таким образом, разработанная методика позволила автоматизировать процесс регистрации данных с борта РС МКС, повысить точность при наведении аппаратуры на объекты подстилающей поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате анализа информации, полученной при проведении многоуровневых экспериментов по дистанционному Зондированию Земли, усовершенствованы существующие методы и алгоритмы регистрации, а также предварительной и тематической обработки данных ДЗЗ [1; 8; 9; 10; 11; 12; 21; 22; 23; 25; 26; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 38; 42; 44].

2. Совместно с коллегами разработаны новые приборы, предназначенные для повышения уровня фундаментальных знаний об отражательных характеристиках объектов земной поверхности: гониофотометр CHERRY, устройство авиаспектральной съемки БЕКАС и система ориентации видеоспектральной аппаратуры СОВА [2; 6; 8; 15; 16; 18; 19; 48; 49].

3. Разработан новый способ фильтрации особых точек при сопоставлении пар кадров для метода автоматизированного получения панорамных изображений при решении задачи сшивки ряда аэрофотоснимков сверхвысокого пространственного разрешения [4; 5; 43].

4. Для разработанного комплекса БЕКАС предложена методика формирования фотоспектральных изображений с использованием нового метода сшивки кадров, обеспечивающая привязку спектров к RGB-изображениям с относительной точностью до $84,9 \pm 11,6\%$. Разработан новый способ

программной синхронизации данных спектрометра и обзорной камеры, который для данных БЕКАС позволил уменьшить время рассинхронизации со 142 мс до 15 мс [6; 17; 20; 45].

5. Разработана методика получения географически привязанных мультиспектральных данных БПЛА для мониторинга состояния отдельных деревьев, отличающаяся особым способом геопривязки, обеспечивающим средний радиус разброса значений географических координат деревьев относительно их математического ожидания 1,35 м с СКО 1,03 м, и новым алгоритмом семантической сегментации, который позволяет повысить точность распознавания крон деревьев на изображениях с 75% до 92% [7; 24; 27; 39; 40; 41; 46; 47].

6. Разработаны три модификации СОВА, отличающиеся устройством и техническими параметрами, прошедшие испытания и работающие на борту РС МКС. Создана методика получения геопривязанных данных при съемке с борта МКС, отличающаяся используемым в программном обеспечении СОВА новым алгоритмом наведения полей зрения НА и применением нового метода комбинирования изображений, позволяющая автоматизировать процесс регистрации и предварительной обработки данных ДЗЗ и обеспечивающая конечную неопределенность географической привязки изображений до $22,9 \pm 13,1$ метров [3; 5; 8; 13; 14; 34; 35; 36; 37; 43].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Методы и алгоритмы обработки фото- и мультиспектральных данных для мониторинга состояния природных объектов, а также алгоритмы и программное обеспечение регистрации и первичной обработки данных внедрены в «НИИ КС им. А. А. Максимова» - филиал АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева» (акт о практическом использовании результатов исследования от 09.09.2023).

Различные модификации СОВА работают на борту Российского сегмента Международной космической станции в космическом эксперименте «Ураган». По результатам разработки методического и программного обеспечения для работы СОВА осуществлено внедрение в Центр целевого использования МКС ПАО «РКК «Энергия» методов и алгоритмов ориентирования СОВА в составе специального программного обеспечения платформы наведения СОВА (акт о практическом использовании результатов исследования от 24.04.2024).

Аппаратные, программные и методические разработки, описанные в диссертации, могут быть использованы при формировании методик мониторинга состояния природных объектов, в том числе, при анализе состояния древостоев на основе данных мультивременных измерений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих п. 19 Положения о присуждении и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Кросс-калибровка данных «Фотоспектральной системы» с борта МКС в космическом эксперименте «Ураган» / М. Ю. Беляев, Б. И. Беляев, Л. В. Катковский, А. А. Ломако, А. О. Мартинов, В. В. Рязанцев, Э. Э. Сармин, О. О. Силук // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 45–55.

2. Гониофотометр для измерения коэффициентов спектральной яркости и спектров пропускания / И. И. Бручковский, О. О. Силук, Г. С. Литвинович, А. А. Ломако, В. В. Станчик, С. И. Гуляева // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, №2. – С. 303–310.

3. Метод прогнозирования углов ориентации научной аппаратуры при съемке с борта Международной космической станции с использованием платформы наведения / А. А. Ломако, В. В. Станчик, Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский, Б. И. Беляев, М. Ю. Беляев // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, №2. – С. 22–30.

4. Ломако, А. А. Метод формирования панорамных изображений по мультиспектральным данным беспилотного летательного аппарата, учитывающий дисторсию камеры / А. А. Ломако // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 2. – С. 60–69.

5. Ломако, А. А. Дисторсия фотоаппаратуры как фактор ухудшения качества сшивки и геопривязки регистрируемых с борта Международной космической станции изображений поверхности Земли / А. А. Ломако, Ю. С. Давидович, И. В. Рассказов // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2023. – № 1. – С. 85–94.

6. Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial Spectrometry Vehicle / A. A. Lamaka, A. V. Gutarau, N. G. Shcherbakou, P. V. Ivuts // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 1. – Р. 7–17.

7. Ломако, А. А. Методика обработки данных авиационных мультиспектральных измерений для мониторинга состояния отдельных деревьев / А. А. Ломако // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 5. – С. 9–27.

Статьи в других научных изданиях

8. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на международной космической станции

/ Б. И. Беляев, М. Ю. Беляев, П. А. Боровихин, Ю. В. Голубев, А. А. Ломако, В. В. Рязанцев, Э. Э. Сармин, В. А. Сосенко // Космическая техника и технологии. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 69–78.

9. Методики полётных калибровок спутниковой спектральной аппаратуры / Л.В. Катковский, Б. И. Беляев, О. О. Силюк, Г. С. Литвинович, А. О. Мартинов, А. А. Ломако, С. И. Бручовская // Космическая техника и технологии. – 2020. – Т.31, № 4. – С. 80–90.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

10. Ломако, А. А. Система навигации БПЛА по данным аэросъемки / А. А. Ломако // Сборник работ 72-ой научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, Минск, 11-22 мая 2015 г. : в 3 ч. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 2015. – Ч. 1. – С. 414–418.

11. Солнечный спектрополяриметр ССП-600 / Л. В. Катковский, А. О. Мартинов, Ю. А. Крот, С. И. Бручовская, А. А. Ломако, О. О. Силюк, В. В. Станчик, А. Д. Хомицевич // Приборостроение-2016: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23-25 ноября 2016 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 182–183.

12. Ломако, А. А. Методы и алгоритмы анализа гиперспектральных изображений / А. А. Ломако, А. Д. Ширяева // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы четвертой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11-12 мая 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ ; редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 85–87.

13. Ломако, А. А. Прогнозирование положения МКС в пространстве для наведения на объект съемки системы ориентации видеоспектральной аппаратуры / А. А. Ломако, В. В. Станчик, В. А. Сосенко // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы пятой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16-17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ ; редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред) [и др.] . – Минск, 2019. – С. 152–154.

14. Бручовский, И. И. Исследование деформаций зеркала в приборе космического базирования / И. И. Бручовский, Г. С. Литвинович, А. А. Ломако // Приборостроение-2019: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13-15 ноября 2019 г. / БНТУ ; редкол. : О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 474–476.

15. Лабораторный комплекс для измерения коэффициентов спектральной яркости и содержания пигментов в образцах растений / О. О. Силюк, Г. С. Литвинович, А. А. Ломако, В. В. Станчик, С. И. Гуляева, И. И. Бручковский // Приборостроение-2020: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18-20 ноября 2020 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 411–413.

16. Модифицированный вариант системы ориентации видеоспектральной аппаратуры «СОВА-2-426» / Ю. В. Голубев, Н. Г. Щербаков, А. А. Ломако, А. Д. Хомицевич, М. Ю. Беляев, Э. Э. Сармин // Приборостроение-2020: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18-20 ноября 2020 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 425–427.

17. Ломако, А. А. Особенности программной синхронизации спектрометров и периферийного оборудования / А. А. Ломако, Н. С. Щербаков // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы шестой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20-21 мая 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 52–54.

18. Модульный комплекс аппаратуры для спектрометрирования с борта беспилотного летательного аппарата / Н. С. Щербаков, А. А. Ломако, И. И. Бручковский, П. В. Кучинский, В. А. Сосенко, А. Д. Хомицевич // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы шестой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20-21 мая 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 103–105.

19. Беспилотный комплекс авиационного спектрометрирования / А. В. Гуторов, А. А. Ломако, Б. И. Беляев, В. А. Сосенко, П. В. Ивуть // Восьмой Белорусский космический конгресс: материалы конгресса, Минск, 25-27 октября 2022 г. : в 2 т. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2022. – Т. 1. – С. 129–132.

20. Ломако, А. А. Предварительная обработка видеоспектральных данных беспилотного комплекса авиационного спектрометрирования / А. А. Ломако, А. В. Гуторов, Л. В. Катковский // Восьмой Белорусский космический конгресс: материалы конгресса, Минск, 25-27 октября 2022 г. : в 2 т. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2022. – Т. 1. – С. 210–213.

21. Портативный альбедометр для работы в удаленных районах / Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский, А. А. Ломако, А. Д. Хомицевич, А. В. Домарацкий // Приборостроение-2022: материалы 15-й Междунар. науч.-

техн. конф., Минск, 16-18 ноября 2022 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 398–400.

22. Высотный калибровочный пункт для калибровки спутниковых сенсоров и валидации измерений / Ю. В. Голубев, П. В. Ивуть, А. А. Ломако, А. Д. Хомицевич, А. В. Домарацкий, Б. И. Беляев, В. А. Сосенко // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 18-19 мая 2023 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 422–423.

23. Стационарный блок спектральной съемки на базе гиперспектрометра высокого разрешения / П. В. Ивуть, А. А. Ломако, Ю. В. Голубев, А. Д. Хомицевич, В. А. Сосенко // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 18-19 мая 2023 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 433–434.

24. Ломако, А. А. Повышение точности географической привязки изображений, зарегистрированных с использованием беспилотных летательных аппаратов / А. А. Ломако, Л. В. Катковский, Ю. С. Давидович // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 18-19 мая 2023 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 440–442.

25. Определение пространственного разрешения аэрофотосистем в летном эксперименте / А. А. Ломако, П. В. Ивуть, А. В. Гуторов, Н. Г. Щербаков // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 18-19 мая 2023 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.) [и др.] . – Минск, 2023. – С. 443–445.

26. Опытный образец высотного калибровочного пункта для калибровки спутниковых сенсоров и валидации измерений / П. В. Ивуть, Н. Г. Щербаков, А. В. Гуторов, А. А. Ломако, Ю. В. Голубев, Б. И. Беляев, В. А. Сосенко, Г. С. Литвинович, А. Д. Хомицевич // Приборостроение-2023: материалы 16-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 15-17 ноября 2023 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 328–329.

27. Ломако, А. А. Исследование распределений спектральных отражательных характеристик крон ели обыкновенной по данным БПЛА для распознавания усыханий / А. А. Ломако, Л. В. Катковский // Лесное хозяйство: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за изд. И. В. Войтов. – Минск, 2024. – С. 234–236. – URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/65887> (дата обращения: 26.04.2024).

28. Ломако, А. А. Особенности определения параметров для радиометрической коррекции мультиспектральных изображений, зарегистрированных с использованием беспилотных летательных аппаратов / А. А. Ломако, Г. С. Литвинович // Материалы I Белорусского географического конгресса, Минск, 8-13 апреля 2024 г. : в 7 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: Е. Г. Кольмакова (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2024. – Ч. 3. – С. 107–111. – 1 CD-ROM.

Тезисы докладов

29. Lomako, A. Navigation Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles Using Aerial Photographs / A. Lomako // Open Readings 2016: Programme and Abstracts of the 59th Scient. Conf. for students of Physics and Nature Sciences, Vilnius, 15-18 March 2016 / Vilnius University Faculty of Physics. – Vilnius, 2016. – P. 314.

30. Ломако, А. А. Алгоритмы предварительного увеличения разрешения гиперспектральных изображений для задач паншарпенинга / А. А. Ломако, А. Д. Ширяева // XIV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14-18 ноября 2016 г. / ИКИ РАН. – С. 37. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5653> (дата обращения: 19.09.2022).

31. Алгоритмы и программные средства подготовки гиперспектральных данных для тематической обработки / А. Д. Ширяева, А. О. Мартинов, В. А. Иванов, А. А. Ломако, Л. В. Катковский, Б. И. Беляев // XIV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14-18 ноября 2016 г. / ИКИ РАН. – С. 59. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5723> (дата обращения: 19.09.2022).

32. Солнечный спектрополяриметр ССП-600. Результаты наземных измерений спектров атмосферы / Л. В. Катковский, А. О. Мартинов, Ю. А. Крот, С. И. Бручковская, А. А. Ломако, О. О. Силюк, В. В. Станчик, А. Д. Хомицевич // XIV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14-18 ноября 2016 г. / ИКИ РАН. – С. 134. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5593> (дата обращения: 19.09.2022).

33. Lomako, A. Combination Algorithm of Low Resolution Multispectral Image and High Resolution Panchromatic Image for the Belarusian Satellite Data / A. Lomako, L. Katkouski // Open Readings 2017: Programme and Abstracts of the 60th Internat. Scient. Conf. for students of Physics and Nature Sciences, Vilnius, 14-17 March 2017 / Vilnius University Faculty of Physics. – Vilnius, 2017. – P. 381.

34. Многопоточная обработка баллистических параметров международной космической станции для системы ориентации видеоспектральной аппаратуры / А. А. Ломако, В. В. Станчик, Б. И. Беляев, Э. Э. Сармин, Ю. В. Голубев // XV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13-17 ноября 2017 г. / ИКИ РАН. – С. 43. – URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6248 (дата обращения: 19.09.2021).

35. Методика определения оптических характеристик зеркального комплекса для компенсации смаза изображения с борта МКС / Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский, С. И. Бручковская, В. В. Станчик, А. А. Ломако // XVI Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 12-16 ноября 2018 г. / ИКИ РАН. – С. 139. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2018/6865.htm> (дата обращения: 19.09.2021).

36. Система ориентации видеоспектральной аппаратуры как компенсатор «смаза» изображения при съемке фотоаппаратурой с борта МКС / А. А. Ломако, В. В. Станчик, И. И. Бручковский, Г. С. Литвинович // XVI Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 12-16 ноября 2018 г. / ИКИ РАН. – С. 140. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=153&thesis=6846> (дата обращения: 19.09.2021).

37. Photoequipment shooting automatization from an ISS board / A. Lamaka, V. Stanchyk, B. Belyaev, Y. Golubev // EGU General Assembly 2019: Conference Abstracts, Vienna, 7-12 April 2019. – Vol. 21. – URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-8121.pdf> (date of access: 05.06.2019).

38. Методика измерения коэффициентов спектральной яркости и спектров пропускания растительных объектов / И. И. Бручковский, О. О. Силук, А. А. Ломако, Г. С. Литвинович, В. В. Станчик, С. И. Гуляева

// XVIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16-20 ноября 2020 г. / ИКИ РАН. – С. 303. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=174&thesis=8165> (дата обращения: 19.09.2021).

39. Методика определения тематических вегетационных индексов для решения задачи поиска усыхающих хвойных насаждений / Г. С. Литвинович, О. О. Силук, И. И. Бручковский, А. А. Ломако, М. Ю. Беляев, Э. Э. Сармин // XVIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16-20 ноября 2020 г. / ИКИ РАН. – С. 338. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=174&thesis=8169> (дата обращения: 19.09.2021).

40. Метод классификации состояния хвойной растительности на основе генерации индексных изображений для данных мультиспектральных камер / А. А. Ломако, О. О. Силук, Л. В. Катковский, Ю. С. Давидович, М. Ю. Беляев, Э. Э. Сармин // XVIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16-20 ноября 2020 г. / ИКИ РАН. – С. 340. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=174&thesis=8150> (дата обращения: 19.09.2021).

41. Методика определения состояния хвойных лесов по спутниковым данным / О. О. Силук, Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский, А. А. Ломако, М. Ю. Беляев, Э. Э. Сармин // XVIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16-20 ноября 2020 г. / ИКИ РАН. – С. 362. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2020/8157.htm> (дата обращения: 19.09.2021).

42. Результаты обработки измерений спектральных отражательных характеристик вулканических пород, полученных в ходе экспедиции на Курильские острова / А. А. Ломако, Г. С. Литвинович, М. А. Корбан, П. В. Ивуть // 19-я междунар. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 15-19 ноября 2021 г. / ИКИ РАН. – С. 360. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/mythesis.aspx?thesis=8803> (дата обращения: 19.09.2021).

43. Оценка влияния дисторсии камеры на точность комбинирования изображений, полученных с борта МКС / А. А. Ломако, Б. И. Беляев, И. В. Рассказов, М. Ю. Беляев // 20-я междунар. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14-18 ноября 2022 г. / ИКИ РАН. – С. 49. – URL:

<http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=224&thesis=9123> (дата обращения: 19.11.2022).

44. Классификация спутниковых данных вулканически активных территорий по результатам проведения экспедиции на острова Курильской гряды / А. А. Ломако, О. О. Силюк, Л. В. Катковский, Г. С. Литвинович // 20-я междунар. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14-18 ноября 2022 г. / ИКИ РАН. – С. 50. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=224&thesis=9100> (дата обращения: 19.11.2022).

45. Ломако, А. А. Способ программной синхронизации модулей видеоспектральной аппаратуры, предназначенной для установки на беспилотный летательный аппарат / А. А. Ломако // 20-я междунар. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14-18 ноября 2022 г. / ИКИ РАН. – С. 134. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=224&thesis=9122> (дата обращения: 19.11.2022).

46. Применение лабораторных измерений в реляционной базе данных спектральных отражательных характеристик / А. В. Гуторов, Б. И. Беляев, О. О. Красовская, А. А. Ломако, В. А. Сосенко, В. В. Станчик // 21-я междунар. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13-17 ноября 2023 г. / ИКИ РАН. – С. 20. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/mythesis.aspx?thesis=9633> (дата обращения: 20.11.2023).

47. Ломако, А. А. База данных спектральных признаков на основе изображений, зарегистрированных БПЛА, как инструмент для мониторинга характеристик отдельных деревьев / А. А. Ломако, В. В. Станчик, Л. В. Катковский // 21-я междунар. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13-17 ноября 2023 г. / ИКИ РАН. – С. 384. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/mythesis.aspx?thesis=9633> (дата обращения: 20.11.2023).

Патенты

48. Патент ВУ 12640, МПК G01J 3/00 (2006.01), G01N 21/01 (2006.01). Устройство для определения спектральных характеристик органов растений : № и 20200298 : заявлено 16.12.2020 : опубл. 30.06.2021 / Бручковский И. И., Силюк О. О., Литвинович Г. С., Ломако А. А., Станчик В. В.; заявитель Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета. – 7 с.

49. Патент ВУ 13010, МПК G01N 21/01 (2006.01). Устройство для авиаспектральной съемки : № и 20220118 : заявлено 25.05.2022 : опубл.

30.10.2022 / Бручковский И. И., Гуторов А. В., Домарацкий А. В., Ивуть П. В., Литвинович Г. С., Ломако А. А., Хомицевич А. Д. ; заявитель Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета. – 4 с.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'И.И.' followed by a large, looped flourish.

РЕЗЮМЕ

Ломако Алексей Андреевич

Методы регистрации и обработки данных оптического дистанционного зондирования Земли при проведении многоуровневых экспериментов

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, БПЛА, МКС, система ориентации видеоспектральной аппаратуры, мультиспектральные изображения, сшивка изображений, детекторы точек, дисторсия, географическая привязка изображений, семантическая сегментация, автоматизация.

Цель работы: развитие существующих и разработка новых методов и алгоритмов функционирования и обработки данных фотоспектральных, видеоспектральных и мультиспектральных систем оптического дистанционного зондирования для определения параметров и характеристик природных и антропогенных объектов Земли, позволяющих повысить эффективность работы с данными в части качества и информативности.

Методы исследования и использованная аппаратура: методы обработки данных оптического дистанционного зондирования, методы интеллектуального анализа изображений, методы моделирования орбиты искусственных спутников Земли, мультиспектральные камеры, беспилотный комплекс авиационного спектрометрирования (БЕКАС), система ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА).

Полученные результаты и их новизна: разработан и реализован в виде программного модуля метод автоматизированного получения панорамных изображений. Метод применен к данным нового комплекса БЕКАС, при разработке видеоспектрального модуля которого использовался новый способ синхронизации данных спектрометра и камеры. Разработана методика обработки мультиспектральных изображений БПЛА для мониторинга состояния отдельных деревьев, отличающаяся новым алгоритмом геопривязки и новым способом уточнения результатов семантической сегментации. Разработана методика регистрации и обработки данных с борта МКС, использующая СОВА, отличающаяся новым методом прогнозирования углов наведения полей зрения научной аппаратуры, учитывающим ориентацию станции в режиме реального времени.

Рекомендации по использованию: Результаты работы соискателя внедрены в Центр целевого использования МКС ПАО «РКК «Энергия» для работы СОВА, в «НИИ КС им. А. А. Максимова» – филиал АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева» для обработки данных.

Область применения: регистрация и обработка данных дистанционного зондирования Земли, интеллектуальный анализ изображений.

РЭЗІЮМЭ

Ламака Аляксей Андрэевіч

Метады рэгістрацыі і апрацоўкі даных аптычнага дыстанцыйнага зандзіравання Зямлі пры правядзенні шматузроўневых эксперыментаў

Ключавыя словы: дыстанцыйнае зандзіраванне Зямлі, БПЛА, МКС, сістэма арыентацыі відэаспектральнай апаратуры, мультыспектральныя здымкі, сшыўка здымкаў, дэтэктары абласцей, дысторсія, геаграфічная прывязка здымкаў, семантычная сегментацыя, аўтаматызацыя.

Мэта работы: развіццё існуючых і распрацоўка новых метадаў і алгарытмаў функцыянавання і апрацоўкі даных фотаспектральных, відэаспектральных і мультыспектральных сістэм аптычнага дыстанцыйнага зандзіравання для вызначэння параметраў і характарыстык прыродных і антрапагенных аб'ектаў зямлі, якія дазваляюць павысіць эфектыўнасць работы з данымі ў частцы якасці і інфарматыўнасці.

Метады даследавання і выкарыстання апаратура: метады апрацоўкі даных аптычнага дыстанцыйнага зандзіравання, метады інтэлектуальнага аналізу здымкаў, метады мадэлявання арбіты штучных спадарожнікаў Зямлі, мультыспектральныя камеры, беспілотны комплекс авіяцыйнага спектраметрыравання (БЕКАС), сістэма арыентацыі відэаспектральнай апаратуры (САВА).

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны і рэалізаваны ў выглядзе праграмнага модуля метадаў аўтаматызацыі генерацыі панарамных здымкаў. Метадаў ужыты да даных новага комплексу БЕКАС, пры распрацоўцы відэаспектральнага модуля якога выкарыстоўваўся арыгінальны спосаб сінхранізацыі даных спяктраметра і камеры. Распрацавана метадыка апрацоўкі мультыспектральных здымкаў БПЛА для маніторынгу стану асобных дрэў, адрозная арыгінальным алгарытмам геапрывязкі і новым спосабам ўдакладнення вынікаў семантычнай сегментацыі. Распрацавана метадыка рэгістрацыі і апрацоўкі даных з борта МКС, якая выкарыстоўвае САВА і адрозніваецца аўтарскім метадам прагназавання вуглоў навадзення палёў гледжання навуковай апаратуры, які ўлічвае арыентацыю станцыі ў рэжыме рэальнага часу.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: Вынікі работы суіскальніка ўкаранёны ў Цэнтр мэтавага выкарыстання МКС ПАТ «РКК «Энергія» для работы САВА, у «НДІ КС ім. А.А. Максімава» – філіял АТ «ГКНПЦ ім. М. У. Хрунічава» для апрацоўкі даных.

Вобласць ужывання: рэгістрацыя і апрацоўка даных дыстанцыйнага зандзіравання Зямлі, інтэлектуальны аналіз здымкаў.

SUMMARY

Lamaka Aliaksei

Methods of optical remote sensing data registration and processing during multi-level experiments

Keywords: remote sensing, UAV, ISS, orientation system of video spectral equipment, multispectral images, image stitching, point detectors, distortion, geographic image binding, semantic segmentation, automatization.

Goal of the research: development of existing and creation of new methods and algorithms for the functioning and data processing of photospectral, videospectral and multispectral optical remote sensing systems to determine the parameters and characteristics of natural and anthropogenic objects of the Earth, allowing to increase the efficiency of working with data in terms of quality and informativeness.

Research methods and equipment used: methods of optical remote sensing data processing, methods of intelligent image analysis, methods of modeling the orbit of artificial Earth satellites, multispectral cameras, unmanned aerial spectrometry complex (UASV), orientation system of video spectral equipment (SOVA).

Results and their novelty: The method of automated panoramic image acquisition has been developed and implemented as a software module. The method is applied to the data of the new UASV complex, during the development of the video spectral module of which the original method of synchronizing the spectrometer and camera data was used. A technique for processing multispectral UAV images for monitoring the state of individual trees has been developed, characterized by an original georeferencing algorithm and a new way to refine the results of semantic segmentation. A technique for recording and processing data from the ISS using SOVA has been developed. This technique differs in the author's method of predicting the orientation angles of the scientific equipment fields of view. The method allows to consider the real-time changing ISS orientation.

Recommendations for use: The results of the applicant's work were implemented in the Center for the Targeted Use of the International Space Station of PJSC «RSC «Energia» for the work of the SOVA, in the «A. A. Maksimov Research Institute of CS» – a branch of JSC «M. V. Khrunichev State Scientific Research Center» for data processing.

Application area: remote sensing data registration and processing, intelligent image analysis.

